

2.5 Polare Mesozyklonen: Die Hurrikane der Polargebiete

GÜNTHER HEINEMANN

Polar mesocyclones: hurricanes of the polar regions: Cyclones with small spatial scales occurring poleward of the main polar front are known as »polar mesocyclones« or »polar lows«. They can have a severe impact on local weather. Detection and forecast of polar mesocyclones is of vital importance for human activities in polar regions. Observations show near-surface wind speeds up to 35 m/s, thunderstorms and strong snowfall. Because of their sometimes spiraliform convective cloud structure the term »polar hurricanes« is also used.

Mit der Verfügbarkeit von hochaufgelösten Satellitenbildern wurden neben synoptischskaligen Zyklonen an der Polarfront auch polwärts der Polarfront mesoskalige Zyklonen beobachtet, die nicht in das Schema der Polarfronttheorie eingeordnet werden konnten, aber erhebliche Auswirkungen auf das Wettergeschehen hatten. Beobachtet wurden bodennahe Windgeschwindigkeiten bis zu 35 m/s, Gewitter und starke Schneeniederschläge. Aufgrund der teilweise spiralförmigen, konvektiven Wolkenstruktur wurde auch der Begriff »polare Hurrikane« geprägt. Die Untersuchung von mesoskaligen Zyklonen in polaren Regionen erwies sich wegen des weitmaschigen synoptischen Beobachtungsnetzes als schwierig, besonders dann, wenn diese Zyklonen über Ozeanen auftraten. Dies war auch der Grund, dass sich das wissenschaftliche Interesse den arktischen Mesozyklonen erst seit Anfang der sechziger Jahre intensiver widmete (HARLEY 1960, HARROLD & BROWNING 1969).

Da sich die Untersuchungen von polaren Mesozyklonen v.a. auf die Nordhemisphäre konzentrierten, lagen bis Ende der 1980er Jahre kaum Untersuchungen in der Südhemisphäre vor. Einen ersten Hinweis auf die Existenz von Zyklonen in der Kaltluft polwärts der Südpolarfront gibt die Untersuchung von STRETEN & TROUP (1973), jedoch sind aufgrund der verwendeten Daten in dieser Statistik nur sehr große Kaltluftwirbel enthalten. Auch die Studien von CARLETON (1979, 1981) befassten sich nur mit den größeren Mesozyklonen. Untersuchungen auch kleinerer antarktischer Mesozyklonen wurden erst seit 1987 veröffentlicht (BROMWICH, 1987; WARREN UND TURNER, 1989; CARLETON & CARPENTER, 1990; HEINEMANN, 1990).

Mit Beginn der Entdeckung der antarktischen Mesozyklonen wurde eine lange Diskussion über die Terminologie dieser Systeme in beiden Polarregionen geführt. Die European Polar Low Working Group (HEINEMANN & CLAUD 1997) hat die Bezeichnung »polare Mesozyklone« (MC) für alle polaren Zyklonen polwärts der Polarfront mit einer horizontalen Skala kleiner 2.000 km eingeführt. Das »polar low« (PL) ist ein Untertyp, der auf maritime Systeme mit bodennahen Windstärken mit mehr als 15 m/s beschränkt ist.

Charakteristiken und Entwicklungsprozesse

Phänomenologie

Subsynoptische Zyklonen in Polargebieten treten im gesamten Spektrum der Skala Meso- α (200-2.000 km) und im oberen Bereich der Skala Meso- β (20-200 km) mit stark variablen Intensitäten auf. Da ihre Lebensdauer oft weniger als 12 h beträgt und ihre Genese häufig über den polaren Ozeanen stattfindet, werden sie durch das synoptische Routinemessnetz nur in wenigen Fällen erkannt und sind daher auch oft in den synoptischen Analysen nicht enthalten. Polare Mesozyklonen auf der Nordhemisphäre wurden in nahezu allen durch polare Kaltluftausbrüche betroffenen Gebieten untersucht, z.B. über dem Japanischen Meer (NINOMIYA 1991), dem Bering-Meer, dem Golf von Alaska und dem Nordpazifik (BUSINGER & BAIK 1991; BUSINGER 1987, REED 1979), der Labrador See, der Hudson Bay und der Davis-Straße (ROCH et al. 1991) sowie in den Gebieten der Grönland See, der Norwegischen See und der Barents See (LYSTAD 1986, BUSINGER 1985, RASMUSSEN 1983). Von besonderem Interesse waren polare Mesozyklonen immer dann, wenn sie von markanten Wettererscheinungen wie hohen Windgeschwindigkeiten oder Niederschlägen begleitet waren. So wurden z.B. von zwei aufeinanderfolgenden Mesozyklonen über Großbritannien jeweils Schneefälle mit über 25 mm Wasseräquivalent beobachtet (HARROLD & BROWNING 1969), zahlreiche Gewitter mit mehreren Tornados waren mit einer Mesozyklone an der nordpazifischen Küste verbunden (REED & BLIER 1986). In der Umgebung von intensiven polaren Mesozyklonen über der Norwegischen See traten bodennahe Windgeschwindigkeiten von bis zu 35 m/s auf (LYSTAD 1986).

Abb. 2.5-1 und -2 zeigen Beispiele für Mesozyklonen im Bereich der Norwegischen und der Barents See. Für die Mesozyklone am 27.2.87 (Abb. 2.5-1) wurden beim Erreichen der norwegischen Küste Windgeschwindigkeiten von mehr als 20 m/s gemessen. Mit Hilfe von numerischen Simulationen (NORDENG & RASMUSSEN 1992) wurde für dieses polar low die Ausbildung eines warmen Kerns beobachtet, der in Satellitenbildern als »Auge« erschien und zusammen mit der Spiralstruktur der Wolkenbänder die Analogie zu tropischen Wirbel-

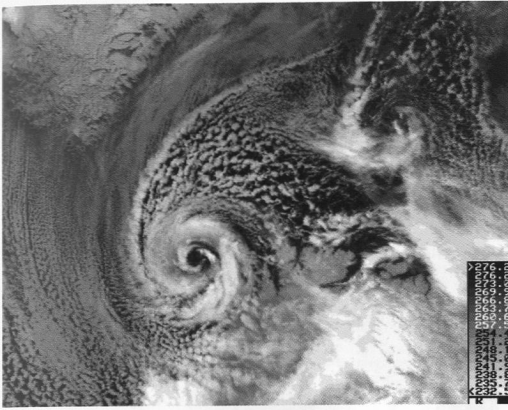


Abb.2.5-1: AVHRR-Infrarotbild einer Mesozyklone (polar low) zwischen Nordnorwegen und Spitzbergen am 27. Februar 1987, 4:10 UTC (nach HEINEMANN 1995).

stürmen nahelegte (»polar hurricanes«). Diese ausgeprägte Spiralstruktur stellt allerdings die Ausnahme dar. Ein typisches Beispiel einer arktischen Mesozyklone zeigt Abb. 2.5-2. Diese Mesozyklone entstand nahe der Meereiskante bei Spitzbergen und verlagerte sich innerhalb von drei Tagen bis nach Südnorwegen.

Beispiele von polaren Mesozyklonen in der Südhemisphäre zeigen Abb. 2.5-4 und -5. Im Vergleich zur

Arktis befinden sich in der Antarktis im Bereich südlich von 50 °S nur relativ wenige synoptische Stationen. So ist es hier noch wesentlich unwahrscheinlicher, dass polare Mesozyklonen in den synoptischen Analysen enthalten sind. Antarktische Mesozyklonen weisen seltener konvektive Wolkenstrukturen als in der Arktis auf, auch die Intensitäten sind generell geringer, auch wenn eine intensive polare Mesozyklone nahe Halley im January 1986 dokumentiert wurde (TURNER et al. 1993), bei der bodennahe Windgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s gemessen wurden. Weitere Beispiele von Mesozyklonen über dem Weddellmeer finden sich bei HEINEMANN (1990).

Instabilitätsmechanismen

Für die Entstehung von polare Mesozyklonen sind drei Instabilitätsmechanismen verantwortlich: 1) barokline Wellen, 2) Konvektion (CISK/ASII) und 3) orographisch bedingte oder barotrope Instabilität (Abb. 2.5-6).

Orographisch bedingte Genese von polaren Mesozyklonen tritt z.B. am Rand des antarktischen Kontinents (KLEIN & HEINEMANN 2001, HEINEMANN & KLEIN 2003) und an der Ostküste von Grönland (KLEIN & HEINEMANN 2002) auf. Hier spielen katabatische Winde eine

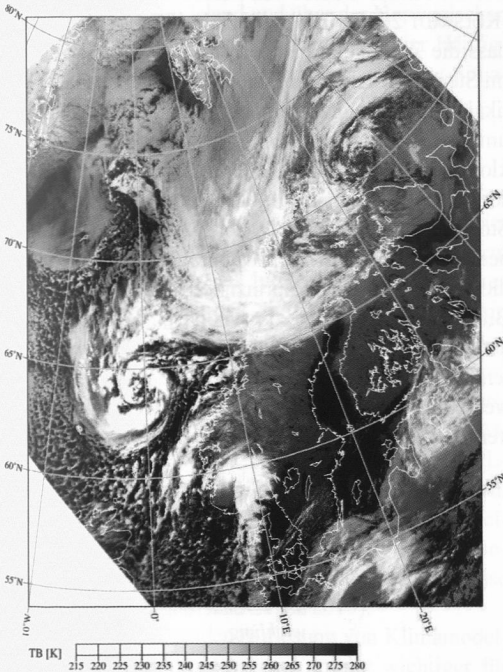


Abb.2.5-2: AVHRR-Infrarotbild einer Mesozyklone über der Norwegischen See am 15. Oktober 1993, 13:30 UTC (nach CLAUD et al. 2004).

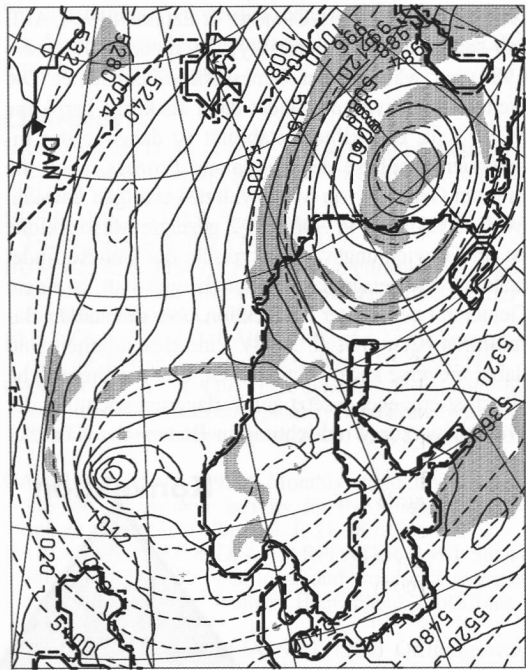


Abb.2.5-3: Simulation des Bodendrucks (MSLP, durchgezogene Linien, Abstand 4 hPa) und geopotentielle Höhe in 500 hPa (gestrichelt, Abstand 40 gpm) für den 15. Oktober 1993, 12 UTC. Gebiete mit einer relativen Feuchte in 700 hPa > 90% sind schattiert (nach CLAUD et al. 2004).

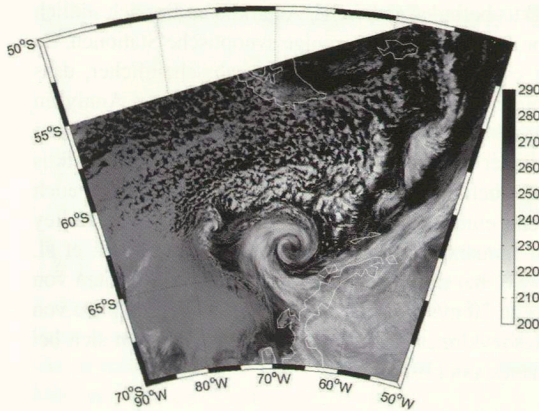


Abb.2.5-4: AVHRR-Infrarotbild einer Mesozyklone westlich der Antarktischen Halbinsel am 28. April 2009, 01:59 UTC (nach HEINEMANN & SAETRA 2013).

bedeutsame Rolle, da sie neben dem Effekt der Vorticityproduktion durch Wirbelstreckung auch zu einer Erhöhung der Baroklinität beitragen. Obwohl einige Mesozyklonen im Wolkenbild tropischen Wirbelstürmen ähneln, so werden die mit Konvektion verbundenen Instabilitätsmechanismen (CISK (conditional instability of the second kind), CHARNEY & ELIASSEN 1964, ASII (air-sea interaction instability), EMANUEL & ROTUNNO 1989) nur während der Genese beobachtet. Die weitere Intensivierung findet dann als kurze barokline Welle statt. Barokline Instabilität ist daher in der Intensivierungsphase der dominante Prozess, auch die meisten Genesen von Mesozyklonen erfolgen baroklin (Abb. 2.5-6). Die in Abb. 2.5-2 gezeigte Mesozyklone ist im Entwicklungsverlauf typisch: die Genese findet nahe der Meereisgrenze bei Spitzbergen statt, in einem Gebiet mit verstärkter Konvektion, aber mit starker Baroklinität (CLAUD et al. 2004). Eine Besonderheit sind dabei »reverse shear« Situationen, d.h. der thermische Wind ist entgegengesetzt zur Verlagerungsrichtung der Welle bzw. zur Windrichtung in Bodennähe (DUNCAN

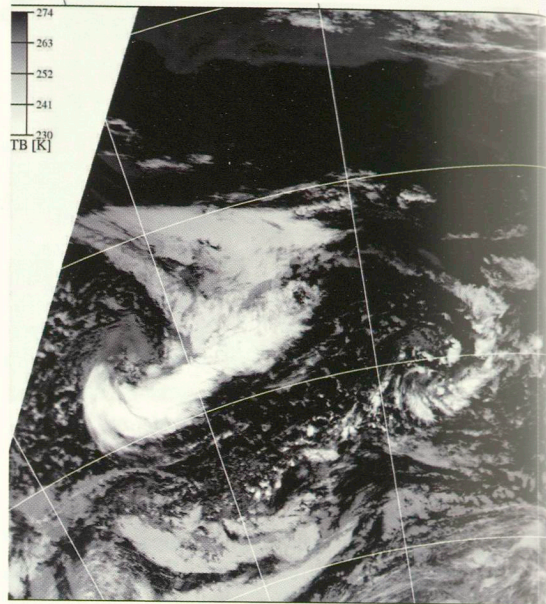


Abb.2.5-5: AVHRR-Infrarotbild einer Mesozyklone über dem Rossmeer der Antarktis am 11.1.1995, 04:00 UTC (Breitenkreise in 5° Abstand, nach LIEDER & HEINEMANN 1999).

1978). Diese Situation wird über der Norwegischen See oft bei der Genese von Mesozyklonen angetroffen (KOLSTADT 2006). Ein wesentliches Merkmal ist dabei, dass die Zyklone am Boden stromaufwärts des Trops im Steuerniveau entsteht und die Trogachse in der Vertikalen in Strömungsrichtung geneigt ist, also genau umgekehrt im Vergleich zu synoptisch-skaligen Zyklonen der Polarfront. Eine Genese von intensiven Mesozyklonen wird dann beobachtet, wenn die barokline Störung in der unteren Troposphäre durch einen Höhentrog getriggert wird. Insgesamt zeigen sich bis auf die Genese phase keine prinzipiellen Unterschiede des Bildungsmechanismus von synoptisch-skaligen Zyklonen und polaren Mesozyklonen, wenn auch bei letzteren diabatische Prozesse eine größere Rolle spielen. So werden in der Umgebung von polaren Mesozyklonen extreme Oberflächenenergieflüsse von bis zu 1.000 W/m²

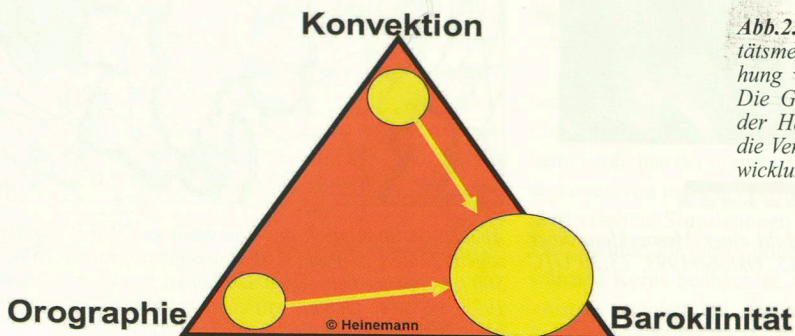


Abb.2.5-6: Schema der Instabilitätsmechanismen für die Entstehung von polaren Mesozyklonen. Die Größe der Kreise entspricht der Häufigkeit, die Pfeile zeigen die Veränderung während der Entwicklung.

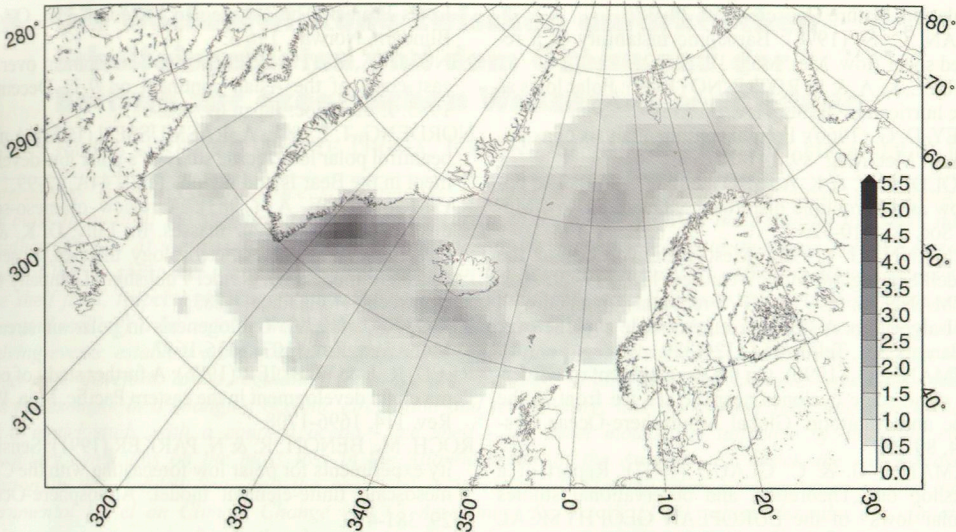


Abb. 2.5-7: Häufigkeit von polaren Mesozyklonen über dem Nordatlantik (Anzahl pro 250 km² und pro Jahr) nach Simulationen mit einem regionalen Klimamodell für den Zeitraum 1948–2006 (aus ZAHN & VON STORCH 2008).

(als Summe der Flüsse latenter und sensibler Wärme) beobachtet (SHAPIRO et al. 1987).

Die Verteilung der Auftrittshäufigkeit von polar lows über dem Nordatlantik (Abb. 2.5-7) zeigt das absolute Maximum bei Ostgrönland, weitere Maxima zeigen sich südlich von Island und über der Norwegischen See. Letzteres stimmt mit dem Maximum der Häufigkeit von Kaltluftausbrüchen und »reverse shear«-Situationen überein (KOLSTAD 2006).

Ausblick und weitere Forschung

Die Erforschung von polaren Mesozyklonen, insbesondere die Verbesserung der Vorhersagbarkeit und der klimatischen Relevanz, ist nach wie vor von großem Interesse. Im Rahmen des Internationalen Polarjahres (IPY) 2007-2009 wurden mesoskalige Prozesse in polaren Regionen intensiv erforscht. Dies sind neben den Mesozyklonen auch katabatische Windsysteme, orographische Jets, Grenzschichtfronten, Kaltluftausbrüche und arktische Fronten. Auf regelmäßigen Arbeitstreffen der European Polar Low Working (EPLWG) werden aktuelle Ergebnisse von Studien auf dem Bereich von Experimenten, der Klimatologie, Modellierungen und der Fernerkundung von polaren Mesozyklonen und anderen polaren mesoskaligen Prozesse vorgestellt (HEINEMANN & SAETRA 2013).

Mit der zunehmenden Auflösung von Klimamodellen werden diese Prozesse auch immer wichtiger für internationale Forschungsprogramme wie die World Climate Research Programme (WCRP), Polar Climate Predictability Initiative und das World Weather Research Programme (WWRP) Polar Predictability Project. So zeigen CONDRON & RENFREW (2013), dass die

Berücksichtigung von polaren mesoskaligen Prozessen beim Antrieb eines hochaufgelösten Ozeanmodells zu einer deutlichen Verstärkung der tiefreichenden Ozean-Konvektion im Nordatlantik führt. Zusammen mit einer zu erwartenden Abnahme von Mesozyklonen im 21. Jahrhundert würde dies eine verstärkte Abnahme der Atlantischen Meridionalzirkulation im Rahmen des Klimawandels bedeuten.

Literatur

- BROMWICH, D. H. (1987): A case study of mesoscale cyclogenesis over the southwestern Ross Sea. *Antarct. J. U.S.* 22(5), 254-256.
- BUSINGER, S. (1985): The synoptic climatology of polar low outbreaks. *Tellus* 37A, 419-432.
- BUSINGER, S. (1987): The synoptic climatology of polar-low outbreaks over the Gulf of Alaska and the Bering Sea. *Tellus* 39A, 307-325.
- BUSINGER, S. & J.-J. BAIK (1991): An Arctic hurricane over the Bering Sea. *Mon. Wea. Rev.* 119, 2293-2322.
- CARLETON, A. M. (1979): A synoptic climatology of satellite-observed extratropical cyclone activity for the Southern Hemisphere winter. *Arch. Met. Biokl. Ser. B* 27, 265-279.
- CARLETON, A. M. (1981): Monthly variability of satellite-derived cyclonic activity for the Southern Hemisphere winter. *J. of Climatol.* 1, 21-38.
- CARLETON, A. M. & D. A. CARPENTER (1990): Satellite climatology of 'polar lows' and broadscale climatic associations for the Southern Hemisphere. *J. of Climatol.* 10, 219-246.
- CHARNEY, J. G. & A. ELIASSEN (1964): On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.* 21, 68-75.
- CLAUD, C., HEINEMANN, G., RAUSTEIN E. & L. MCMURDIE (2004): Polar low 'Le Cygne': Satellite observations and numerical simulations. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 130, 1075-1102.
- CONDRON, A. & I. A. RENFREW (2013): The impact of polar mesoscale storms on northeast Atlantic Ocean

- circulation. *Nature Geoscience* 6, 34–37.
- DUNCAN, C. N. (1978): Baroclinic instability in a reversed shear flow. *Met. Mag.* 107, 17–23.
- EMANUEL, K. A. & R. ROTUNNO (1989): Polar lows as arctic hurricanes. *Tellus* 41A, 1–17.
- HARLEY, D. G. (1960): Frontal contour analysis of a „polar“ low. *Met. Mag.* 89, 141–147.
- HARROLD, T. W. & K. A. BROWNING (1969): The polar low as a baroclinic disturbance. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 95, 710–723.
- HEINEMANN, G. (1990): Meso-scale vortices in the Weddell Sea region. *Mon. Wea. Rev.* 118, 779–793.
- HEINEMANN, G. (1995): TOVS retrievals obtained with the 3I-algorithm: A study of a meso-scale cyclone over the Barents Sea. *Tellus* 47A, 324–330.
- HEINEMANN, G. (1996): On the development of wintertime meso-scale cyclones near the sea ice front in the Arctic and Antarctic. *Global Atmosphere-Ocean System* 4, 89–123.
- HEINEMANN, G. & C. CLAUD (1997): Report of a workshop on „Theoretical and observational studies of polar lows“ of the EUROPEAN GEOPHYSICAL SOCIETY POLAR LOWS WORKING GROUP. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78, 2643–2658.
- HEINEMANN, G. & T. KLEIN (2003): Simulations of topographically forced mesocyclones in the Weddell Sea and the Ross Sea region of Antarctica. *Mon. Wea. Rev.* 131, 302–316.
- HEINEMANN, G. & Ø. SAETRA (2013): A Workshop on Polar Lows. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, ES123–ES126, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00190.1>.
- KLEIN, T. & G. HEINEMANN (2001): On the forcing mechanisms of mesocyclones in the eastern Weddell Sea region: Process studies using a mesoscale numerical model. *Meteorol. Zeitschrift N.F.* 10, 113–122.
- KLEIN, T. & G. HEINEMANN (2002): Interaction of katabatic winds and mesocyclones at the eastern coast of Greenland. *Meteorological Applications* 9, 407–422.
- KOLSTAD, E. (2006): A new climatology of favourable conditions for reverse shear polar lows, *Tellus, Ser. A*, 58, 344–354.
- LIEDER, M. & G. HEINEMANN (1999): A summertime Antarctic mesocyclone event over the Southern Pacific during FRÖST SOP3: A meso-scale analysis using AVHRR, SSM/I, ERS and numerical model data. *Weather and Forecasting*, 14, 893–908.
- LYSTADT, M. (1986): Polar lows in the Norwegian, Greenland and Barents Sea. Final report of the Polar Lows Project, The Norwegian Meteorol. Inst. Oslo 3. Blindern, Norway, 196 S.
- NINOMIYA, K. (1991): Polar low development over the east coast of the Asian continent on 9–11 December 1985. *J. Met. Soc. Japan* 69, 669–685.
- NORDENG, T. E. & E. A. RASMUSSEN (1992): A most beautiful polar low. A case study of a polar low development in the Bear Island region. *Tellus* 44A, 81–99.
- RASMUSSEN, E. A. (1983): A review of meso-scale disturbances in cold air masses. In: Lilly, D. K. & T. Gal-Chen. *Mesoscale meteorology theories, observations and models*. D. Reidel Publishing Company Co., Dordrecht, Holland. 247–283.
- REED, R. J. (1979): Cyclogenesis in polar air streams. *Mon. Wea. Rev.* 107, 1636–1647.
- REED, R. J. & W. BLIER (1986): A further study of comma cloud development in the eastern Pacific. *Mon. Wea. Rev.* 114, 1696–1708.
- ROCH, M., BENOIT, R. & N. PARKER (1991): Sensitivity experiments for polar low forecasting with the CMC mesoscale finite-element model. *Atmosphere-Ocean*, 29, 381–419.
- SHAPIRO, M. A., FEDOR, L. S. & T. HAMPEL (1987): Research aircraft measurements of a polar low over the Norwegian Sea. *Tellus* 39A, 272–306.
- STRETEN, N. A. & A. J. TROUP (1973): A synoptic climatology of satellite observed cloud vortices over the Southern Hemisphere. *Quart. J. R. Met. Soc.* 99, 56–72.
- TURNER, J., LACHLAN-COPE, T. A., WARREN, D. E. & C. N. DUNCAN (1993): A mesoscale vortex over Halley Station, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.* 121, 1317–1336.
- WARREN, D. E. & J. TURNER (1989): Studies of Antarctic mesoscale systems using satellite imagery and sounder data. In: Twitchell, P.F., E.A. Rasmussen & K.L. Davidson (Eds.): *Polar and Arctic lows*. A. Deepak Publishing, 421 S.
- ZAHN, M. & H. VON STORCH (2008): A long-term climatology of North Atlantic polar lows. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22702, doi:10.1029/2008GL035769.

Kontakt:

Prof. Dr. Günther Heinemann

Universität Trier

*FB Raum- und Umweltwissenschaften, Umweltmeteorologie
heinemann@uni-trier.de*